

低温下孔隙水和孔隙结构对饱水岩石导热性的影响

Effect of Pore Water and Pore Structure on Thermal Conductivity of Saturated Rock at Low Temperature

朱董珠

(陕西铁道工程勘察有限公司, 西安 710043)

摘要: 为探索孔隙尺寸、孔隙结构对冻结过程中饱和岩石热扩散率的影响。采用任意加热法测量了细砂岩、粗砂岩、凝灰岩和花岗岩的热扩散系数。总结不同含水状态与温度下, 岩体热扩散系数的变化规律和相关性。分析了孔隙度和孔隙结构对饱和岩石在冻结过程中的热扩散率的影响。结果表明, 饱和岩石冷却过程中热扩散系数的变化主要取决于孔隙结构与孔径分布, 而不是岩石含水量与孔隙率。含有大孔隙的岩石, 如粗砂岩, 在饱和含水状态下具有明显的温度敏感性。因此, 可以通过测量岩体的孔径分布和热物性特征来估计冷却过程中热扩散率的变化行为。

关键词: 岩石; 温度; 热扩散系数; 孔隙率; 孔隙结构

中图分类号: TU454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 01-0094-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.018

ZHU Dongzhu

(Shaanxi Railway Engineering Survey Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: To explore the effect of pore size and structure on thermal diffusivity of saturated rock during freezing. The thermal diffusion coefficients of fine sandstone, coarse sandstone, tuff and granite were measured by arbitrary heating method. The variation law and correlation of thermal diffusivity of rock mass under different water state and temperature are summarized. The effect of porosity and pore structure on thermal diffusivity of saturated rock during freezing is analyzed. The results show that the variation of thermal diffusivity in the cooling process of saturated rock is mainly determined by pore structure and pore size distribution, rather than rock water content and porosity. Rocks with large pores, such as coarse sandstone, have obvious temperature sensitivity at saturated water. Therefore, the variation behavior of thermal diffusivity during cooling can be estimated by measuring the pore size distribution and thermal properties of rock mass.

Key words: rock; temperature; thermal diffusion coefficient; porosity; pore structure

0 引言

研究岩石的热物性质直接影响到地球内部各圈

层至地表各种环境条件下的热生成、储存和传递^[1-2]。获取高质量的岩石热导率数据是解决上述科学和应用问题的基础^[3-4]。随着我国经济飞速发展及能源战略的转变, 我国对天然气、液化氢等低温液化燃料的需求在逐渐增加, 预计天然气、液化氢作为石油的替代能源比例将增加。储存设施是稳定供应低温液化燃料的一个关键性问题, 地下岩体内的储存设施在储存液化燃料时主要关注点就是低温和高压。由于储存罐周围的岩石在基岩中储存液化燃

作者简介: 朱董珠 (1984—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 岩土工程勘察、施工及管理工作。

收稿日期: 2023-07-07

料时被冷却，因此有必要研究空腔周围岩体对热应力的稳定性。预测空腔周围岩石在不同温度情况下的热扩散特征对于这种热应力分析极为重要。

诸多学者在岩石热物性质方面取得众多研究成果。刘善琪等^[5]研究发现孔隙度和含水状态对岩石导热性存在很大的影响；刘绍文等^[6]通过大量试验发现饱水岩石热扩散系数比干燥岩石高，但是根据岩性不同差别较大；陈振鸣等^[7]研究发现花岗岩热传导系数随着温度的增高逐渐减少；Brodsky 等^[8]测量了尤卡山岩石热导率与比热数值；刘建军等^[9]从常见矿物热物理性质方面进行研究，分析了岩石热物理性质与干密度之间的关系；李继山^[10]通过试验分析油藏压力、岩石孔隙率、含水饱和度等参数与岩石导热系数的关系，探讨了油藏内传热特点。赵秀峰等^[11]研究发现随着温度的逐渐降低碳酸盐岩热扩散系数随温度降低总体呈现降低的趋势。

在阐明孔隙尺寸、孔隙结构对冻结过程中饱和岩石热扩散率的影响，具体而言，研究不同孔隙率结构和孔隙尺寸的花岗岩、细砂岩、粗砂岩和凝灰岩的热扩散率，总结其变化规律，研究了孔隙率、孔隙结构不同饱和岩石在冻结过程中热扩散率的变化行为，为相关项目提供帮助。

1 试验方法

1.1 试验材料

花岗岩是钾长石（粒径 0.5~4 mm）、斜长石（最大 5 mm）、石英（1~2 mm）、黑云母（0.2~1 mm）、角闪石（0.5~3 mm）等矿物组成的孔隙率小的岩石。细砂岩是平均粒径 0.1~0.2 mm 左右的砂粒组成，略有棱角，但分选很好，主要由石英组成，含有少量的长石和方解石、微量的黏土矿物。粗砂岩主要包括圆磨度低的火山岩片、石英、斜长石、由辉石、角闪石等沙粒组成，沙粒间是由细小沸石和砾石胶结而成。凝灰岩主要由长 0.1~0.5 mm 左右的细粒火山玻璃碎片组成，其中大部分为沸石和黏土矿物（主要为蒙脱石），细砂岩、粗砂岩、凝灰岩的孔隙率较大。表 1 为试验岩的物理性质。

使用直径为 35 mm、长度为 70 mm 的圆柱形试样。在试件端面中心和距中心约 10 mm 的位置开两个直径 3 mm、深 35 mm（试件长度的一半）的孔作

为测温孔。根据任意加热法的测定原理，假设试样是无限长度的圆柱，如果圆柱的长度大于直径，则可以忽略来自上下端面的辐射热的影响。试样在 85 ℃ 的干燥箱中干燥至少 48 h，然后冷却至室温，即为研究的干燥状态。然后将干燥状态的试样放入真空容器饱水 72 h 或更长时间获得饱和状态（大约 100% 饱和度）。

表 1 岩石试样性质

Table 1 Properties of rock specimen

岩性	密度/ (g/cm ³)	孔隙率/%
花岗岩	2.65	1.09
粗砂岩	2.15	12.8
细砂岩	2.21	20.2
凝灰岩	2.53	28.7

1.2 试验装置

在热扩散率的测量中，加热条件没有限制，用简单加热法和试样内部温度测量数据得到热扩散率，为了使热电偶前端与测温孔底部中心接触，安装了用绝热材料制作的外径 3 mm、内径 1 mm 圆筒状的导向件，记录 2 处试样测定孔、恒温容器（热源）温度和室内温度。作为恒温容器，使用绝热材料覆盖的真空绝热式杜瓦瓶，热源制冷剂使用乙醇。

1.3 试验步骤

试样预先放入 -20 ~ -10 ℃ 的冷冻箱中冷冻。盖好端面后，整体用保鲜膜覆盖，防止乙醇渗入。热扩散率的测定方法如下：准备比测定的试样温度低 -10 ℃ 的（制冷剂 [低]）和高 +10 ℃ 的（制冷剂 [高]）两种制冷剂，将试件放入装有制冷剂 [低] 的恒温容器中，保持至试件内部两个测量孔的温度一致后。然后迅速将试样放入装有制冷剂 [高] 的恒温容器中，待各测量孔温度变得恒定时结束。

根据试验方案求得相关参数后，通过求解导热微分方程，按公式 (1)^[12] 可以求得试样的热扩散率 a 。

$$\alpha = \frac{d^2(\theta_2)^2}{4(\theta')^2(\sqrt{\tau_2} - \sqrt{\tau_2 - \tau_1})^2} \quad (1)$$

式中： a 为热扩散率； d 为测试点距面热源距离 (m)， θ 为测试点温度升高值； y 为函数 $B(y)$ 的自变量； τ_1 为关掉加热器的时间 (h)； τ_2 为加热停止后，热源上温度升高 θ_2 时的时间 (h)。

测试 -100 ~ -10 ℃ 温度范围内测量试样的热扩散率。

岩土力学

2 试验结果

2.1 花岗岩热扩散率

花岗岩试样温度和热扩散率的关系如图 1 所示。干燥状态下试样热扩散率即使从 25 °C 冷却到 -20 °C 也没有大的变化, 从 -20 °C 冷却到 -90 °C 时, 热扩散率呈微增的倾向。饱水状态下呈现出与干燥状态下类似的特点, 说明孔隙水对饱和花岗岩热扩散率影响非常小。

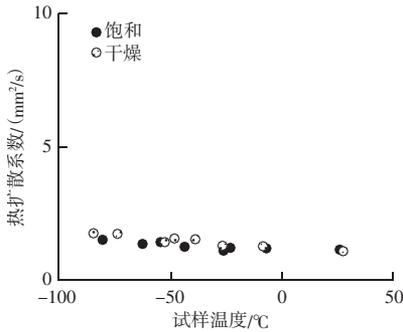


图 1 花岗岩试样温度与热扩散系数的关系
Fig. 1 Relationship between specimen temperature and thermal diffusivity of granite

2.2 粗砂岩热扩散率

粗砂岩试件温度与热扩散率之间的关系如图 2 所示。干燥状态下热扩散率在 30 °C 下约为 1.4 mm²/s, 在 20 °C 下约为 1.5 mm²/s, 没有明显的变化。在 30 °C、15 °C 下, 饱和含水状态下热扩散率约为 1.1 mm²/s, 但冷却到 -10 °C 时, 热扩散率急剧增加到约 2.8 mm²/s。在饱和粗砂岩中, 从 15 °C 到 -10 °C 观察到热扩散率的急剧增加了 1.7 mm²/s, 这是由于孔隙水冻结造成的, 从 -10 °C 到 -95 °C 观察到热扩散率的增加, 可以认为是干燥粗砂岩热扩散率变化加上孔隙冰热扩散率的增加行为。

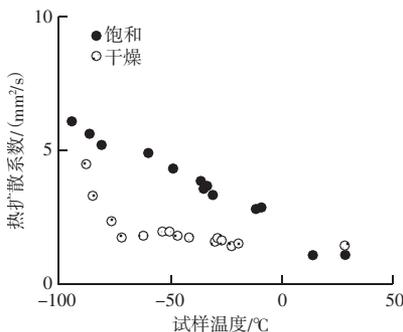


图 2 粗砂岩试样温度与热扩散系数关系
Fig. 2 Relationship between specimen temperature and thermal diffusivity of sandstone

2.3 细砂岩热扩散率

细砂岩的试样温度和热扩散率的关系如图 3 所示。干燥状态下试样热扩散率即使从 25 °C 冷却到 -20 °C 没有大的变化, 从 -20 °C 冷却到 -90 °C 时, 热扩散率呈微增的倾向。饱和细砂岩热扩散率从 25 °C 冷却至 -25 °C 时微增, 之后至 -50 °C 时剧增, 之后趋于恒定。

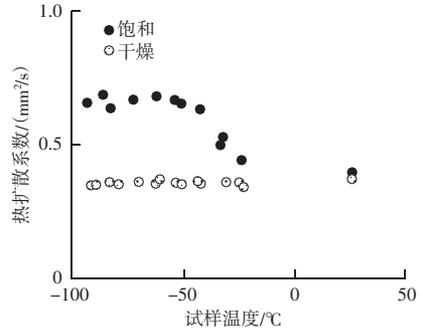


图 3 细砂岩试样温度与热扩散系数关系图
Fig. 3 Relationship between specimen temperature and thermal diffusivity of sandstone

2.4 凝灰岩热扩散率

凝灰岩的试样温度和热扩散率的关系如图 4 所示。饱和凝灰岩热扩散率从 25 °C 到 -90 °C 冷却也几乎没有变化, 不表现出温度依赖性。干燥凝灰岩同样未表现出明显的温度依赖性。但是饱和凝灰岩热扩散率要略高于干燥凝灰岩的热扩散率。

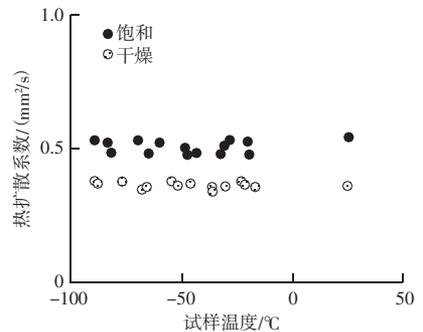


图 4 凝灰岩试样温度与热扩散系数的关系
Fig. 4 Relationship between specimen temperature and thermal diffusivity of tuff

3 试验分析

3.1 孔隙水冻结对热扩散系数的影响

一般来说, 岩石内部的水和空气的热扩散系数低于岩石内的固体材料热扩散系数。同时空气的热扩散率极低, 与岩石和水相比, 几乎可以忽略不计。而冰的热扩散率通过试验结果可以推断出饱和岩体

的热扩散率的增加主要由其内部的孔隙水和孔隙冰造成的。可以将岩体视为矿物、空气、水（冰）的复合体。根据研究成果^[13]，纯水在 0℃ 以上的范围内热扩散率几乎恒定，随着温度下降，在 -4~0℃ 范围内，纯水逐渐冻结成冰，热扩散率迅速增加，随后呈现增加的趋势逐渐变缓。根据试验结果，干燥岩石的热扩散率对温度的敏感性极低，此时内部的孔隙水很少，说明岩石矿物本身对温度的敏感性较低。除花岗岩外，其他 3 种测试的孔隙率较高的岩石，随着温度降低，呈现出不同程度的热扩散率升高现象。

3.2 孔隙率对热扩散率的影响

如 3.1 节中所述，饱和岩石冷却到 0℃ 以下时，热扩散率的增加是由孔隙水的冻结引起的。因此，对温度降低导致的饱和岩石的热扩散率的增加进行了比较。按大小排列的话，粗砂岩，细砂岩，凝灰岩的顺序。按孔隙水量（孔隙率）大的岩石顺序，

即凝灰岩（28.7%）、细砂岩（20.2%）、与粗砂岩（12.8%）的顺序相反。因此，研究孔隙结构（细孔径）与热扩散率的关系。

3.3 孔隙结构对热扩散系数的影响

为了研究测试岩石孔隙结构，对粗砂岩、细砂岩和凝灰岩进行扫描电子显微镜试验，结果如图 5 所示。粗砂岩孔隙结构中，造岩矿物间的孔隙较多（图 5（a）），根据水银测孔仪的测试结果，其尺寸为 10 μm 左右的数量级宏观细孔。另一方面，凝灰岩孔隙结构中造岩矿物间孔隙占多数（图 5（c）），其尺寸为 100 nm 以下微小细孔，由于在水银测孔仪测量极限附近（10 nm 以下）孔隙容积率有增加的倾向，也可能有 2 nm 以下孔隙的存在，此外，渗透率测试结果表明渗透系数在 10⁻⁹ cm/s 数量级。综上所述，凝灰岩孔径被认为是非常小的，属于微细孔。

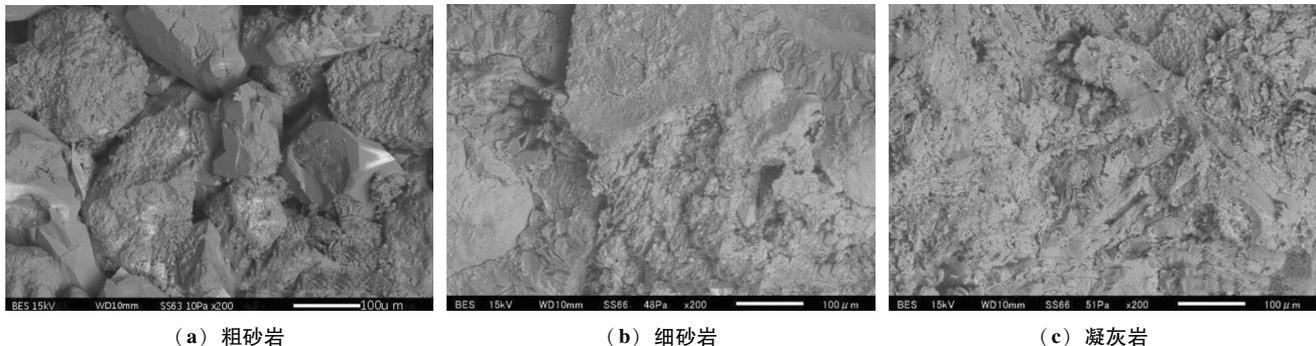


图 5 岩石孔隙结构的扫描电镜图像
Fig. 5 Scanning electron microscopy images of rock pore structure

砂岩中宏观孔隙内的自由水通过冷却而冻结，但微孔内结合水不冻结，黏土矿物间的结合水即使冷却也不冻结，粗砂岩矿物粒子间（宏细孔）孔隙占多数，在自由水温度低于 0℃ 时就会冻结，从而导致热扩散率剧增，而凝灰岩在黏土矿物间孔隙（微细孔）占多数中则是：结合水即使在 0℃ 以下也不冻结，因此可以认为热扩散率不表现出温度依赖性。另外，根据对粗砂岩和凝灰岩的分析，细砂岩从 0℃ 到 -50℃ 之间热扩散率增加行为是矿物粒子间（微细孔）散装水的冻结过程，在 -50℃ 以下热扩散率没有变化的行为表明，占孔隙水大部分黏土矿物间（微细孔）的结合水没有冻结。另外，研究表明，与水具有较强相互作用的极性物质界面附近水分子，极性物质之间距离越窄，冻结温度就越

低。从 0℃ 到 -50℃ 热扩散率增加行为是在凝固点（0℃）附近，孔隙水并不是一次冻结，而是从宏细孔内孔径较大孔隙水开始依次冻结的过程。另一方面，像凝灰岩这样微细孔占大部分的岩石，孔隙水可能几乎不会冻结。

4 结论

(1) 通过对细砂岩、粗砂岩、凝灰岩和花岗岩在不同含水状态下热扩散率测试发现，饱和花岗岩热扩散率与干燥花岗岩基本相同，饱和粗砂岩热扩散率从 15℃ 冷却到 -10℃ 后剧增，表现出与干燥砂岩不同的变化行为。饱和粗砂岩热扩散率从 25℃ 冷却至 -25℃ 时微增，之后至 -50℃ 时剧增，至 -50℃ 以下时趋于恒定。饱和凝灰岩热扩散（下转第 118 页）

建筑结构

- 56, 51.
- [2] 丁发兴, 罗开源, 吕飞, 等. 钢管混凝土柱-钢梁外加强环螺栓连接节点抗震性能有限元分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41 (4): 10-19.
- [3] 邱增美, 李孟鸽, 李幅昌, 等. 不同含钢率下内置工字形 CFRP 型材方钢管混凝土压弯构件抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (增刊1): 133-141.
- [4] 王春刚, 李珊珊, 张壮南, 等. 带边缘约束构件的双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (增刊1): 206-215.
- [5] 高润东, 张永群, 李向民. 砖砌体结构耐久性劣化与加固修复的抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (16): 151-158.
- [6] 董慧慧, 古智钧, 杜修力, 等. 近场脉冲型地震作用下附加支撑双柱式摇摆桥墩的抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2024, 41 (5): 13-25.
- [7] 倪韦斌, 张旭, 王少杰, 等. 不同轴压比下浆锚连接装配式异形柱框架结构的抗震性能试验研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2022, 53 (7): 2719-2732.
- [8] 杨参天, 李爱群, 贾军波. 含转动摩擦型干式梁-柱节点的新型装配式混凝土框架结构抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2022, 39 (8): 223-231.
- [9] 金浏, 梁健, 陈凤娟, 等. 宽厚比对足尺方钢管混凝土短柱抗震性能影响的试验研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (22): 1-9, 59.
- [10] 赵云丽, 李冉. 考虑风险极限的建筑钢结构抗震延性检测仿真 [J]. 计算机仿真, 2024, 41 (8): 562-566.
- [11] 李成玉, 李冬奎, 柏入宁, 等. 基于体系能力设计法的设置连续柱钢框架结构抗震性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24 (11): 91-100, 112.
- [12] 毛宇光, 刘钰中, 杜运兴, 等. 梁纵筋黏结状况对矿渣地聚物混凝土梁柱中节点抗震性能的影响 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (11): 89-98.
- [13] 左光恒, 戴少鹏, 张盛飞, 等. 法兰连接预制拼装双柱式桥墩抗震性能研究 [J]. 北京工业大学学报, 2022, 48 (5): 496-506.
- [14] 王国林, 杨冀锴, 祁尚远, 等. CFRP 板条嵌入式加固 RC 框架节点的抗震性能试验研究及有限元分析 [J]. 地震工程学报, 2022, 44 (6): 1260-1267.
- [15] 何应道, 肖明清, 封坤, 等. 公轨合建盾构隧道管片-内部结构复合体系横向抗震性能研究——以济南黄河隧道为例 [J]. 隧道建设 (中英文), 2022, 42 (8): 1404-1413.

(上接第 97 页)

率即使从 $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 几乎没有变化, 不表现出温度依赖性。

(2) 结合扫描电镜试验发现冷却过程中饱和岩石热扩散率取决于孔隙结构, 而不是整个岩石的含水量。

(3) 可以通过测量造岩矿物的孔径分布和热物性来估计冷却过程中热扩散率的变化行为。

参 考 文 献

- [1] 栾锡武, 高德章, 喻普之, 等. 我国东海陆架地区新生代地层的热导率 [J]. 海洋与湖沼, 2002 (2): 151-159.
- [2] 宋小庆, 江明, 彭钦, 等. 贵州主要岩石地层热物性参数特征及影响因素分析 [J]. 地质学报, 2019, 93 (8): 2092-2103.
- [3] VILA M, FERNANDEZ M, IMENEZ M I. Radiogenic heat production variability of some common lithological groups and its significance to lithospheric thermal modeling [J]. Tectonophysics, 2010, 490 (3): 152-164.
- [4] ZHOU Y, MU G, ZHANG H, et al. 2017. Geothermal field division and its geological influencing factors in Guanzhong basin [J]. Geology in China, 44 (5): 1017-1026 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘善琪, 李永兵, 田会全, 等. 2012. 含湿孔隙岩石有效热导率的数值分析 [J]. 地球物理学报, 55 (12): 4239-4248.
- [6] 刘绍文, 李香兰, 郝春艳, 等. 2017. 塔里木盆地的热流、深部温度和热结构 [J]. 地学前缘, 24 (3): 41-55.
- [7] 陈振鸣, 武旭, 王宏伟, 等. 高温条件下花岗岩导热特性研究 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (24): 193-197.
- [8] BRODSKY N S, RIGGINS M, CONNOLLY J. Thermal expansion, thermal conductivity, and heat capacity measurements at Yucca mountain, Nevada [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1997, 34 (3-4): 74. e1-74. e15.
- [9] 刘建军, 刘海蕾. 岩石热物理性质测试与分析 [J]. 西部探矿工程, 2009, 21 (4): 144-147.
- [10] 李继山. 油藏岩石热物理性质测试 [J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33 (5): 23-26, 117, 118.
- [11] 赵秀峰. 温度变化对碳酸盐岩储层岩石热物性的影响 [J]. 地质学刊, 2023, 47 (1): 100-105.
- [12] 赵秀峰, 曹景洋, 罗惠芬. 岩石热物理性质室内测试方法探讨 [J]. 安徽地质, 2016, 26 (1): 61-64, 68.
- [13] CHEN N J, MORIKAWA J, KISHI A, et al. Thermal diffusivity of eutectic of alkali chloride and ice in the freezing thawing process by temperature wave analysis [J]. Thermochimica Acta, 2005, 429: 73-79.